

# 变形条件对挤压态 ZA21 镁合金热变形和腐蚀行为的影响

王盼盼, 江海涛, 王玉娇, 张 韵, 于博文, 仲彬彬, 曹志明

(北京科技大学 工程技术研究院, 北京 100086)

**摘 要:** 研究了变形温度、应变速率和变形量对挤压态 ZA21 镁合金的热变形行为及组织演变的影响规律, 建立了热加工图, 并对失稳区、安全区和最佳加工区试样进行浸泡失重和电化学试验, 研究不同区域内 ZA21 镁合金的腐蚀行为。结果表明: 在高温低应变速率时, ZA21 镁合金的动态软化机制以动态回复为主, 低温高应变速率时, 以动态再结晶为主; 最佳加工区温度为 300~350 °C、应变速率为 0.001~0.01 s<sup>-1</sup>, 这主要与完全动态再结晶的产生有关; 在同一加工工艺下, 随变形量增加, ZA21 镁合金自腐蚀电位明显正移, 自腐蚀电流密度明显下降, 当变形量增加至 60% 时, 自腐蚀电流密度降低了 3~4 个数量级, 这主要是因为晶粒细化导致合金表面形成了更加致密的氧化膜; 但加工失稳区试样的微观组织存在楔形裂纹和明显孔洞, 所以腐蚀速率相对较大。

**关键词:** 挤压态 ZA21 镁合金; 热变形; 热加工图; 腐蚀行为

**中图分类号:** TG146.22

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2020)10-3544-08

镁及其合金具有低密度、高比强度、高比模量、高抗冲击、良好阻尼和尺寸稳定性等结构和工程特性, 作为轻质功能材料, 广泛应用在汽车、航空航天、3C 等领域。但镁合金具有密排六方结构, 滑移系较少, 导致室温成形性较差, 而且镁是电化学活性最高的金属之一, 标准电极电位较低, 耐蚀性差。因此对 ZA21 镁合金通常采用热或温塑性加工的方法成形制造高性能复杂结构件, 如热挤压、热锻及温轧等。这是由于热加工工艺可以显著细化镁合金的微观结构并改善其力学性能和腐蚀特性<sup>[1]</sup>。Li 等人<sup>[2]</sup>研究表明, 挤压态 Mg-Mn-Zn-Nd 合金晶粒明显细化, 其力学性能、生物相容性和耐蚀性都得到改善。晶粒细化之所以可以提高镁合金的耐蚀性, 是由于镁基体上形成了更加致密的钝化膜, 细小的晶粒和均匀分布的第二相颗粒都可以降低微电偶腐蚀的活性<sup>[3]</sup>。因此, 晶粒细化是提高镁合金力学性能和耐蚀性的重要手段<sup>[4]</sup>。

热压缩变形会引起大多数塑性加工金属发生显著变化, 同时影响热加工性能, 因此镁合金对热加工条件很敏感。所以, 变形条件对镁合金力学性能和腐蚀行为至关重要。本研究通过 Gleeble-3500D 热压缩实验获得挤压态 ZA21 镁合金的真应力-应变曲线、Z 参数和应力峰值之间的关系以及热加工图, 并分析热加

工微观组织对其耐蚀性的影响。为镁合金的进一步应用奠定理论基础。

## 1 实 验

实验所用合金为挤压态 ZA21 镁合金, 挤压工艺为: 挤压温度 380 °C、挤压比 18.4、挤压速度 0.4 mm/s, 合金化学成分经 ICP-AES 检测后列于表 1。将热压缩试样加工为  $\Phi 10$  mm×15 mm 的圆柱, 在 Gleeble-3500D 型热模拟试验机上进行单向热压缩实验, 应变速率为 0.001、0.01、0.1、1 s<sup>-1</sup>, 压缩温度为 300、350、400、450 °C, 变形量为 20%、40%、60%。以 5 °C/s 的加热速率升温至变形温度, 保温 3 min 以消除试样内部的温度梯度, 最后在该温度下压缩变形, 随后水淬至室温。压缩前在试样的上下 2 个端面涂抹机油粘上石墨片, 减少摩擦, 使试样均匀变形。将试样沿轴线剖开经 SiC 砂纸逐级研磨、20%硝酸乙醇抛光和 10 mL 醋酸、5 g 苦味酸、140 mL 乙醇的混合溶液侵蚀后, 用 ZEISS ULTRA 55 场发射扫描电镜观察显微组织及形貌和 D8 Advance X 射线衍射仪进行物相测定。

在 0.1 mol/L NaCl 溶液中进行浸泡失重和电化学试验, 浸泡时间为 120 h, 重复 3 次试验, 取平均值。电化学试验采用三电极体系, 试样( $\Phi 10$  mm×2 mm)

收稿日期: 2019-10-29

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金 (2302018FRF-IC-18-004)

作者简介: 王盼盼, 女, 1996 年生, 硕士, 北京科技大学工程技术研究院, 北京 100086, 电话: 010-62332598, E-mail: 1424440771@qq.com

表 1 挤压态 ZA21 镁合金化学成分

Table 1 Chemical composition of as-extruded ZA21 alloy (wt%)

| Al   | Zn   | Ca   | Gd   | Mn   | Fe     | Mg   |
|------|------|------|------|------|--------|------|
| 1.03 | 2.14 | 0.23 | 0.19 | 0.18 | 0.0063 | Bal. |

为工作电极, 铂片为辅助电极, 饱和甘汞为参比电极。开路电位稳定 1 h 后进行电化学阻抗测试(EIS)及动电位极化测试(PDP)。电化学阻抗谱(EIS)测试的频率范围为  $10^5 \sim 10^{-2}$  Hz, 电压幅值为 5 mV。动电位极化测试的扫描速率为 1 mV/s, 电位范围为 OCP(开路电位)  $\pm$  250 mV。通过塔菲尔曲线阴极线性部分外推法得到自腐蚀电位( $E_{\text{corr}}$ )和自腐蚀电流密度( $i_{\text{corr}}$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 原始组织

挤压态 ZA21 镁合金的微观组织如图 1 所示。显然, 该材料微观组织分布不均匀, 由沿挤压方向被拉长的原始粗大组织和周围细小的等轴再结晶晶粒组成, 且沿挤压方向可见明显弥散分布的第二相(图 1a)。根据 XRD 图谱(图 1b)和 EDS 结果(图 1c)可知, 白色颗粒富含 Al、Gd 元素, 且 Al、Gd 原子比接近 3:1, 所以第二相可能为  $(\text{Mg}, \text{Al})_3\text{Gd}$  相<sup>[5,6]</sup>。在高温挤压过程中, 大部分区域发生了动态再结晶(DRX), 但存在典型的线性流变区以及少量沿流线方向被拉长的原始晶

粒。用线性截距法可确定等轴晶(即动态再结晶晶粒)的平均晶粒尺寸约为 4.5  $\mu\text{m}$ 。研究表明, ZA21 镁合金高温变形主要是以  $(0001)\langle 11\bar{2}0 \rangle$  滑移系为主, 其为挤压组织中产生沿流线方向被拉长的原始晶粒的主要机制。具有  $\langle 11\bar{2}0 \rangle$  取向的晶粒能够很好地协调挤压应变, 主要是因为在基面滑移中, 晶粒倾向于发生大变形而不产生孪晶和加工硬化, 但没有足够的储存能来激发动态再结晶<sup>[7]</sup>。

### 2.2 热压缩变形行为

图 2 为不同变形条件下的真应力-应变曲线。曲线主要包括 3 个区域: 第 1 个区域为应力随应变呈线性增加的弹性区域; 其次是加工硬化区, 由于加工硬化机制, 应力急剧上升到峰值; 最后 1 个区域为动态软化区, 动态软化为主要变形机制, 流动应力随应变增加而下降, 并最终达到稳态。在高温低应变速率时, 初始流变应力随应变增加而增大, 达到峰值应力后就基本保持不变, 此时 ZA21 镁合金的动态软化机制主要为动态回复(DRV); 而在低温高应变速率时, 流变应力达到峰值后逐渐下降最终趋于稳定, 此时动态再结晶(DRX)为主要动态软化机制<sup>[8]</sup>。

图 3 为不同变形条件下的典型微观组织。可以看出, 随变形量的增大, 动态再结晶晶粒能通过位错之间的交互作用而形核, 使位错在晶粒内部积累形成亚结构<sup>[9]</sup>, 发生完全动态再结晶(图 3a, 3d, 3g), 晶粒

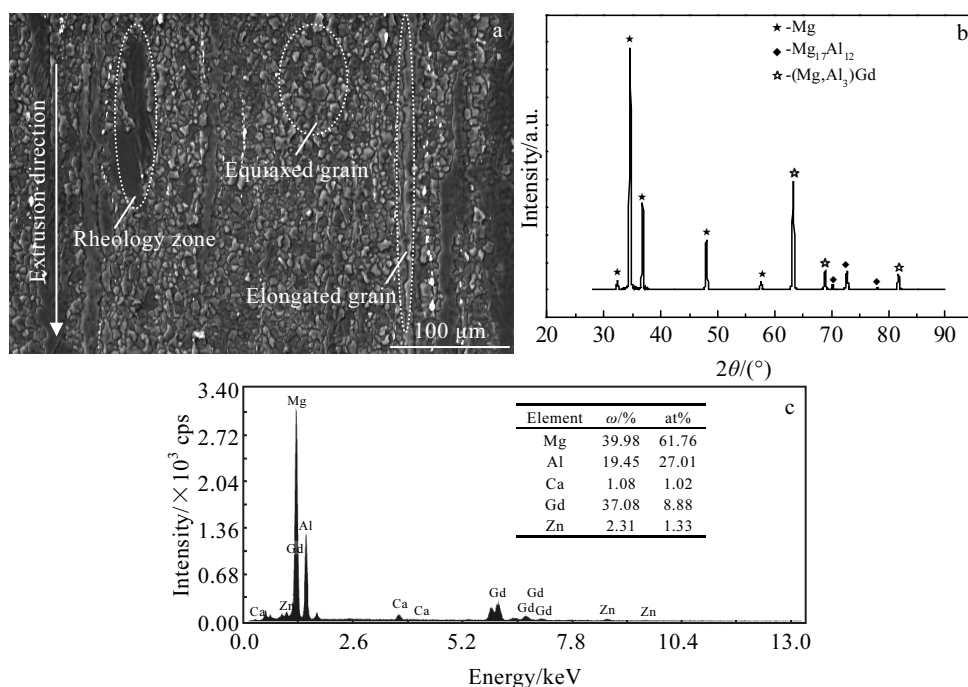


图 1 挤压态 ZA21 镁合金的原始组织, XRD 图谱和 EDS 分析结果

Fig.1 Initial microstructure (a), XRD pattern (b), and EDS result (c) of as-extruded ZA21 magnesium alloy

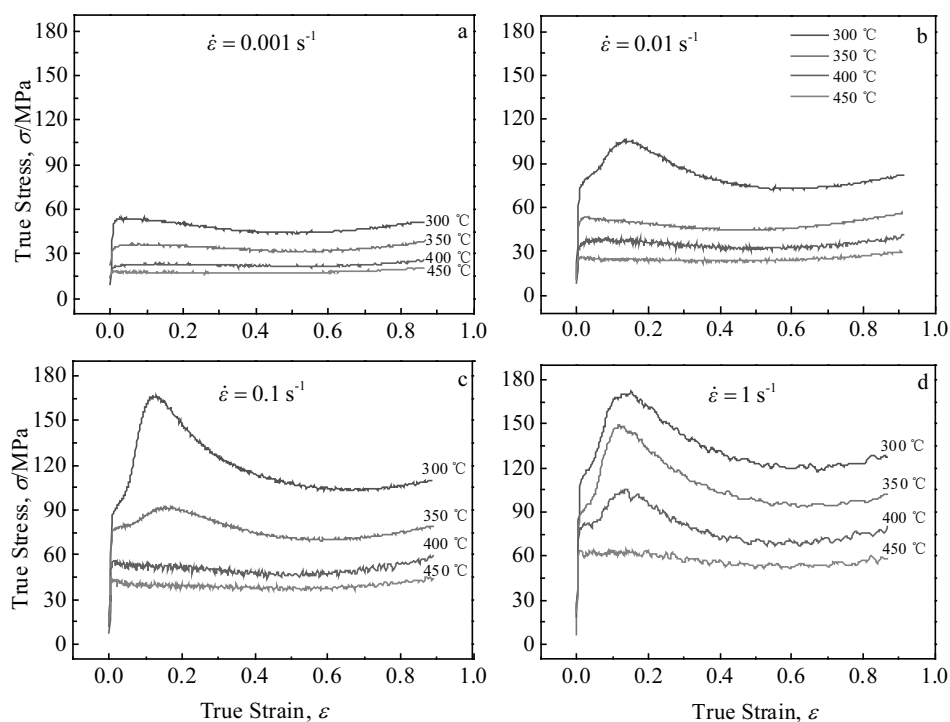


图 2 不同温度和应变速率下试样的真应力-应变曲线

Fig.2 True stress-strain curves of the sample at different temperatures and strain rates: (a)  $0.001 \text{ s}^{-1}$ , (b)  $0.01 \text{ s}^{-1}$ , (c)  $0.1 \text{ s}^{-1}$ , and (d)  $1 \text{ s}^{-1}$

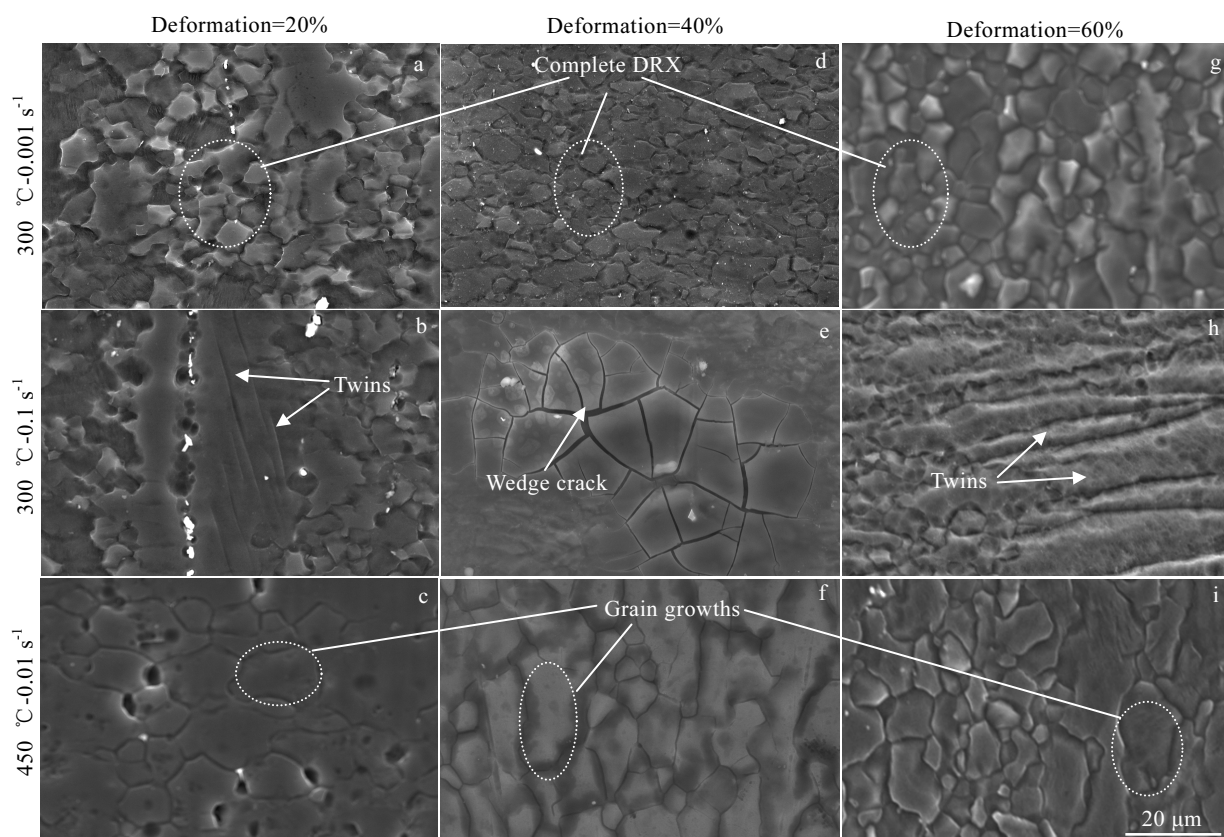
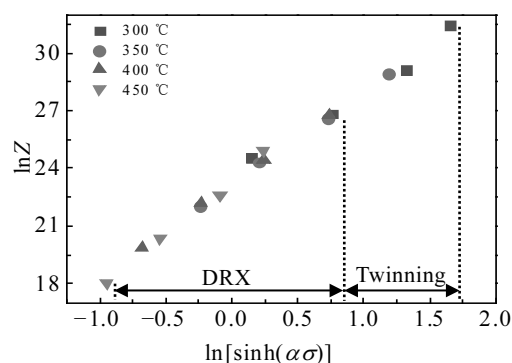


图 3 不同温度和应变速率下形变试样热压缩微观组织

Fig.3 Hot compressed microstructures of the hot deformation samples at different temperatures and strain rates

图 4 热加工变形时  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$  与  $Z$  参数之间的关系Fig.4 Relationship between  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$  and  $Z$  parameters during hot deformation

逐渐细化; 300 °C-0.1 s<sup>-1</sup> 下组织中存在楔形裂纹和明显孔洞, 以及流变区存在大量孪晶; 450 °C-0.01 s<sup>-1</sup> 下组织中由于温度较高, 晶粒发生二次再结晶使部分晶粒发生异常长大, 导致组织不均匀。基于 Prasad 等人<sup>[10]</sup> 提出的动态材料模型(DMM), 可得到 ZA21 镁合金的  $Z$  参数和应力峰值之间的关系(图 4), 以及不同变形量下的热加工图(图 5)。不同变形条件下的  $Z$  参数与流动真应力-应变曲线的形状相关,  $Z$  值较高是由于挤压态

ZA21 镁合金线性流变区形成了大量孪晶(图 3b, 3h)。低温高应变速率易出现孪晶, 是因为温度升高, 基面滑移的临界剪切应力减小, 附加滑移系(锥面和柱面)被激活, 从而使合金变形不易受孪晶的影响<sup>[11]</sup>。多晶结构均匀变形至少需要 5 个独立的滑移系, 仅靠基面滑移和柱面滑移来适应沿  $\langle a \rangle$  方向的应变是不能满足的。因此, 必须激活附加变形, 即锥面滑移或孪生, 来适应沿  $\langle c+a \rangle$  方向的应变。由于非基面滑移可以被热激活, 所以在低温下孪生变形的临界分切应力比滑移低, 易形成孪晶。而且升高温度或降低应变速率为无位错晶粒形核提供了足够的时间, 因此 DRX 是低  $Z$  值时的主要变形机制<sup>[12]</sup>, 如图 3c, 3f, 3i。

镁合金具有较低的层错能(SFE), 所以动态再结晶是热变形过程中的主要软化机制<sup>[13]</sup>。一般认为, 镁合金发生动态再结晶的功率耗散系数( $\eta$ )的临界值为 0.3, 即  $\eta > 0.3$  为最佳加工区。  $\xi(\dot{\epsilon}) \geq 0$  为安全区,  $\xi(\dot{\epsilon}) \leq 0$  为失稳区。热加工失稳图可以反映材料的瞬时可加工性, 失稳区的变形协调能力较差, 变形相对困难。图 5 上的数值代表  $\eta$ , 灰色区域为失稳区, 蓝色区域为最佳加工区。由图可知, 随着变形量增加, 失稳区逐渐扩大, 最佳加工区逐渐缩小。热加工失稳区主要包括 2 个区域: 在低温高应变速率区域(300 °C-0.1 s<sup>-1</sup>), 合金产生了局部流变区, 易引起楔形开裂(图 3e); 高温

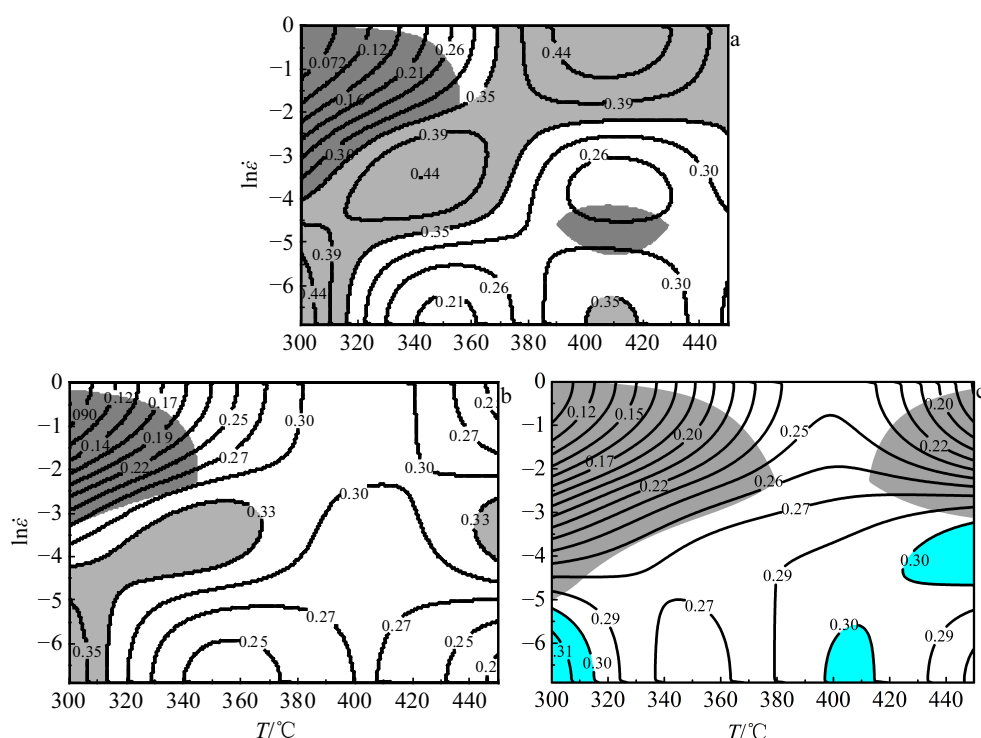


图 5 ZA21 镁合金不同变形量下的热加工图

Fig.5 Processing maps of ZA21 alloy under different deformations: (a) 20%, (b) 40%, and (c) 60%

高应变速率区域, 第二相集中的地方可能产生孔洞状裂纹。最佳加工区主要为低温低应变速率区(如  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  - $0.001\text{ s}^{-1}$ ), 其中变形量为 20%、变形温度为  $350\text{ }^{\circ}\text{C}$  和应变速率为  $0.1\text{ s}^{-1}$  时, 功率耗散系数最大( $\eta=0.44$ )。显然, 最佳加工区(如  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  - $0.001\text{ s}^{-1}$ )发生了完全动态再结晶, 这与微观结构观察到的结果相一致(见图 3a、3d、3g)。

### 2.3 腐蚀行为

根据热加工图, 选取不同变形量(20%、40%、60%)下的最佳加工区( $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  - $0.001\text{ s}^{-1}$ )、失稳区( $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  - $0.1\text{ s}^{-1}$ )和安全区( $450\text{ }^{\circ}\text{C}$  - $0.01\text{ s}^{-1}$ )的试样分别进行浸泡失重和电化学试验, 实验结果及分析如下:

ZA21 镁合金动电位极化曲线和浸泡失重率分别如图 6 和 7 所示, 拟合数据见表 2。由图可知, 随着变形量的增加, 自腐蚀电位明显正移, 腐蚀倾向减小, 自腐蚀电流密度下降 3~4 个数量级。这是因为 ZA21 镁合金的变形量增加导致了晶体结构发生强烈畸变, 晶粒得到进一步的细化, 第二相分布更均匀, 且第二相与基体的电位差减小<sup>[14]</sup>, 微电偶腐蚀作用减弱, 腐蚀速率降低。晶粒细化之所以可以提高合金的耐蚀性, 主要是因为促进了钝化膜的形成速度<sup>[15]</sup>。晶界具有较高的能量和化学活性, 高密度的晶界通过增加电子活

性和扩散来促进表面的反应活性, 以及晶粒细化使合金表面氧化膜具有更多的形核点, 加速了钝化膜的形成, 即合金耐蚀性的提高与组织细化和表面钝化膜的形成有关。晶界密度增加, 基体表面和氧化膜之间的错配度降低, 形成了更具附着力和完整的钝化层。而且, 晶粒细化改善了膜层和基体之间的结构不连续性, 有利于形成致密的保护膜<sup>[16]</sup>。由图 7b 可知, 失稳区的腐蚀速率明显较大, 是因为失稳区存在的楔形裂纹和明显孔洞为离子扩散提供了通道, 促进了侵蚀性  $\text{Cl}^{-}$  离子进入基体, 加速基体腐蚀。

ZA21 镁合金交流阻抗谱和 EIS 拟合电路如图 8 所示, 拟合数据见表 3。显然, EIS 图形状相似, 均由一个高频容抗弧和一个低频感抗弧组成, 说明合金腐蚀机理及影响腐蚀过程的因素是相同的<sup>[17]</sup>。高频容抗弧是由于 Mg 基体与溶液界面的双电层所导致的, 高频电容回路与电荷转移电阻有关, 决定合金的耐蚀性; 低频感抗弧表明合金发生了点蚀。由图 8 可知, 随变形量增加, 高频容抗弧的半径明显增大, 耐蚀性显著提高, 其中变形量为 60% 时, 最为明显, 与极化曲线、浸泡失重结果相一致。在 EIS 等效电路拟合中, 用恒相位元件(CPE)代替电容器(C)来补偿由于试样表面存在第二相、划痕和氧化膜而造成的不均匀性。其中  $R_s$

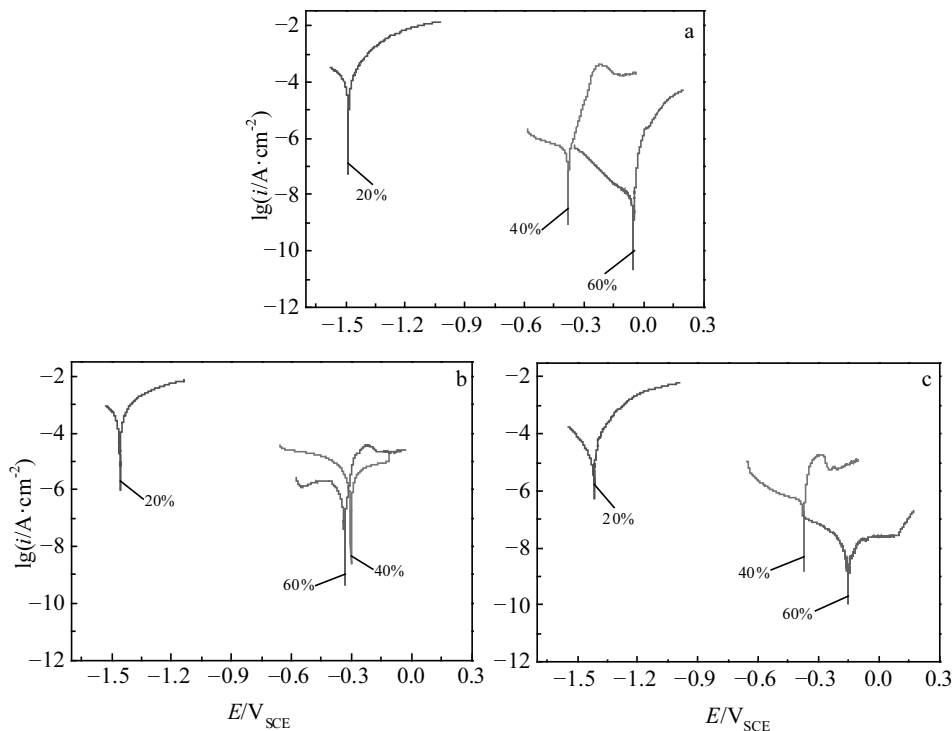


图 6 在不同变形量下热压缩 ZA21 镁合金的极化曲线

Fig.6 Polarization curves of ZA21 alloy for thermal compression under different deformations: (a)  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  - $0.001\text{ s}^{-1}$ , (b)  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  - $0.1\text{ s}^{-1}$ , and (c)  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$  - $0.01\text{ s}^{-1}$

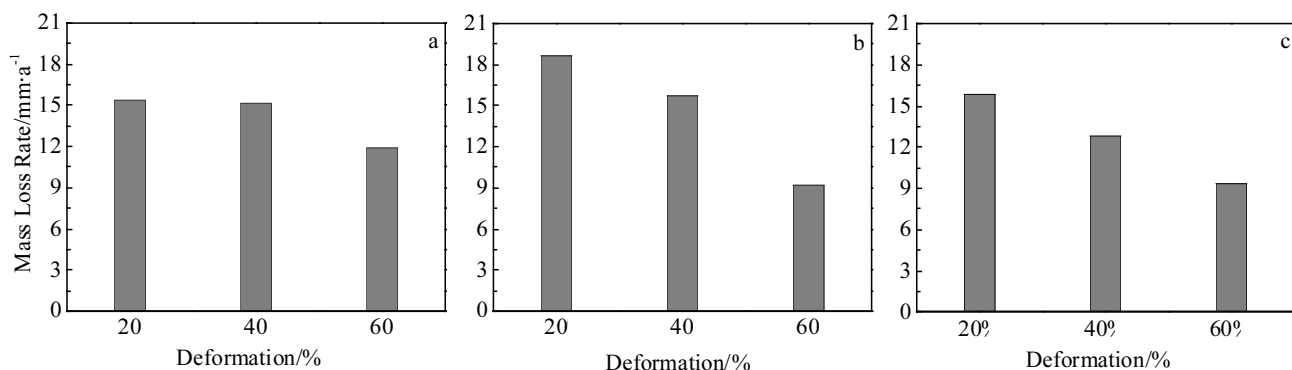


图 7 不同变形量下热压缩 ZA21 镁合金在 0.1 mol/L NaCl 溶液浸泡 5 d 后的失重率

Fig.7 Mass loss rates of ZA21 alloy for thermal compression under different deformations after soaking for 5 d in 0.1 mol/L NaCl solution: (a) 300 °C-0.001 s<sup>-1</sup>, (b) 300 °C-0.1 s<sup>-1</sup>, and (c) 450 °C-0.01 s<sup>-1</sup>

表 2 极化曲线的拟合数据( $P_m$ 、 $P_i$ 分别为从浸泡失重和极化曲线得到的腐蚀速率)Table 2 Fitting data of the polarization curves ( $P_m$  and  $P_i$  are the corrosion rates obtained by the immersion mass loss and the polarization curve, respectively.)

| Deformation condition                            | Deformation/% | $E_{\text{corr}}/\text{V}_{\text{SCE}}$ | $i_{\text{corr}}/\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ | $P_i/\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$ | $P_m/\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$ |
|--------------------------------------------------|---------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 300 °C-0.001 s <sup>-1</sup><br>(DRX zone)       | 20            | -1.49                                   | $1.01\times 10^{-4}$                          | 2.25                              | 15.43                             |
|                                                  | 40            | -0.39                                   | $4.26\times 10^{-7}$                          | $9.49\times 10^{-3}$              | 15.14                             |
|                                                  | 60            | -0.11                                   | $7.66\times 10^{-9}$                          | $1.71\times 10^{-4}$              | 11.91                             |
| 300 °C-0.1 s <sup>-1</sup><br>(Instability zone) | 20            | -1.45                                   | $2.63\times 10^{-4}$                          | 5.86                              | 18.63                             |
|                                                  | 40            | -0.39                                   | $4.91\times 10^{-6}$                          | 0.11                              | 15.75                             |
|                                                  | 60            | -0.40                                   | $9.25\times 10^{-7}$                          | $2.06\times 10^{-2}$              | 9.22                              |
| 450 °C-0.01 s <sup>-1</sup><br>(Safe zone)       | 20            | -0.45                                   | $1.74\times 10^{-5}$                          | 0.39                              | 15.90                             |
|                                                  | 40            | -0.40                                   | $3.93\times 10^{-7}$                          | $8.75\times 10^{-3}$              | 12.87                             |
|                                                  | 60            | -0.11                                   | $1.77\times 10^{-8}$                          | $3.94\times 10^{-4}$              | 9.38                              |

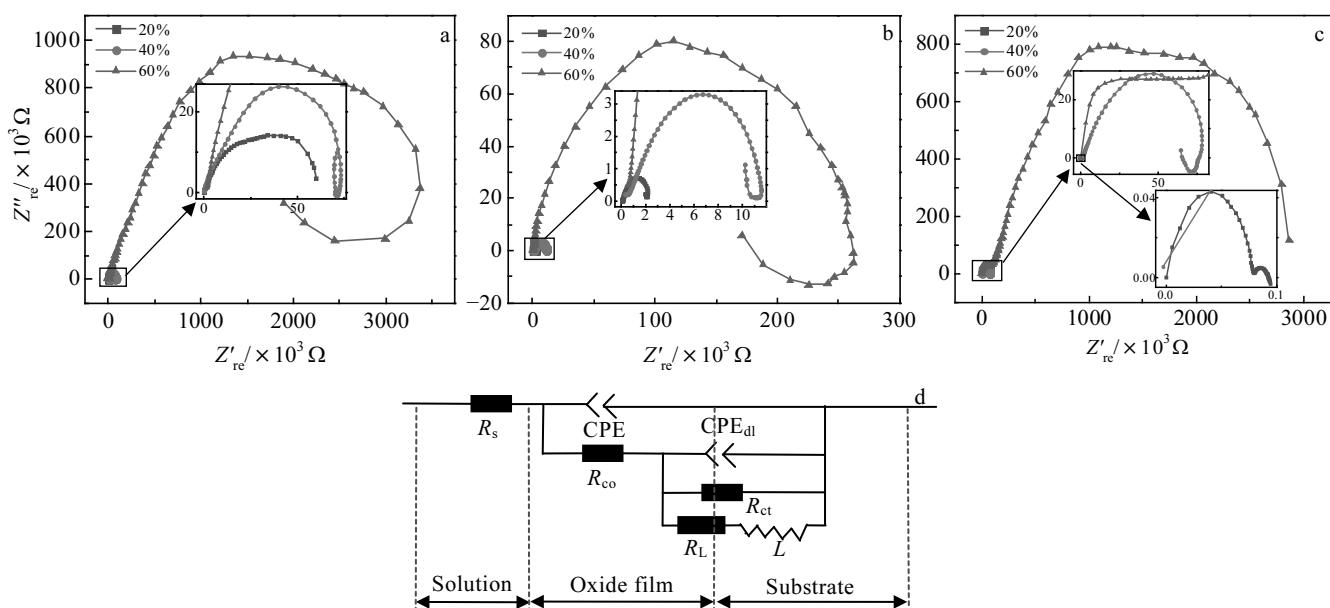


图 8 在不同变形量下热压缩 ZA21 镁合金的交流阻抗谱及其 EIS 拟合电路

Fig.8 Impedance spectra (a~c) and EIS fitting circuit (d) of ZA21 alloy for thermal compression under different deformations amounts:

(a) 300 °C-0.001 s<sup>-1</sup>, (b) 300 °C-0.1 s<sup>-1</sup>, (c) 450 °C-0.01 s<sup>-1</sup>

表 3 交流阻抗谱拟合数据  
Table 3 Fitting data of impedance spectra

| Deformation condition                            | Deformation/% | $R/\Omega \cdot \text{cm}^2$ |                 |                    |                    | $C/\mu\text{F} \cdot \text{cm}^{-2}$ |                    | $L/\text{H} \cdot \text{cm}^{-2}$ |
|--------------------------------------------------|---------------|------------------------------|-----------------|--------------------|--------------------|--------------------------------------|--------------------|-----------------------------------|
|                                                  |               | $R_s$                        | $R_{co}$        | $R_{ct}$           | $R_L$              | CPE                                  | $\text{CPE}_{dl}$  |                                   |
| 300 °C-0.001 s <sup>-1</sup><br>(DRX zone)       | 20            | 78                           | 1035            | $3 \times 10^4$    | $1 \times 10^{17}$ | 1                                    | 4                  | $4 \times 10^{-5}$                |
|                                                  | 40            | 165                          | 3957            | $7 \times 10^4$    | $1 \times 10^5$    | $3 \times 10^{-2}$                   | $7 \times 10^{-2}$ | $2 \times 10^{-6}$                |
|                                                  | 60            | 1795                         | $3 \times 10^5$ | $2 \times 10^5$    | $6 \times 10^{11}$ | $7 \times 10^{-3}$                   | $4 \times 10^{-2}$ | $2 \times 10^5$                   |
| 300 °C-0.1 s <sup>-1</sup><br>(Instability zone) | 20            | 69                           | 1295            | 2147               | 3177               | 25                                   | 129                | $1 \times 10^{-4}$                |
|                                                  | 40            | 450                          | $2 \times 10^4$ | 6705               | $8 \times 10^{12}$ | $1 \times 10^{-2}$                   | 14                 | $1 \times 10^{20}$                |
|                                                  | 60            | 591                          | $2 \times 10^5$ | $1 \times 10^5$    | $9 \times 10^{14}$ | $9 \times 10^{-3}$                   | 1                  | 205                               |
| 450 °C-0.01 s <sup>-1</sup><br>(Safe zone)       | 20            | $1 \times 10^{-2}$           | 62              | 7                  | $7 \times 10^{15}$ | 29                                   | 10                 | $1 \times 10^{-20}$               |
|                                                  | 40            | 77                           | 277             | 1922               | $1 \times 10^{11}$ | $3 \times 10^{-2}$                   | $8 \times 10^{-2}$ | 34                                |
|                                                  | 60            | $4 \times 10^4$              | $9 \times 10^4$ | $2 \times 10^{15}$ | $2 \times 10^6$    | $2 \times 10^{-3}$                   | $8 \times 10^{-2}$ | $8 \times 10^{-2}$                |

为溶液电阻, CPE 和  $R_{co}$  为表面氧化膜的电容和电阻,  $R_{co}$  主要由膜的孔隙率以及溶液电导率决定;  $R_{ct}$  和  $\text{CPE}_{dl}$  为电荷转移电阻和双电层电容;  $R_L$  和  $L$  代表低频电感回路,  $R_L$  为电感电阻,  $L$  是氧化膜/基体界面电化学反应的感抗, 这与局部腐蚀起始阶段的腐蚀形核有关<sup>[18]</sup>。在相同加工工艺下, 随变形量增加, CPE 和  $\text{CPE}_{dl}$  值逐渐减少, 说明氧化膜阻挡电解质的渗透作用增强, 腐蚀活性面积减少;  $R_{co}$  值增加, 表明氧化膜的致密性增加; 以及在金属/溶液界面上,  $R_{ct}$  值急剧增加, 这代表界面阻碍电荷传递的能力增强。即在相同加工工艺下, 随变形量的增加, 晶粒进一步细化, 形成了更加均匀致密的氧化膜, 耐蚀性得到提高。

### 3 结 论

1) 在高温低应变速率时, ZA21 镁合金动态软化机制以动态回复为主; 而在低温高应变速率时, 动态再结晶为主要软化机制。

2) 最佳加工区范围: 温度 300~350 °C、应变速率 0.001~0.01 s<sup>-1</sup>, 这主要与完全动态再结晶的产生有关。

3) 在同一加工工艺下, 随变形量增加, ZA21 镁合金的自腐蚀电位明显正移, 自腐蚀电流密度下降了 3~4 个数量级, 是因为晶粒细化导致形成了更加致密的氧化膜; 但失稳区试样的微观组织存在楔形裂纹和明显的孔洞, 腐蚀速率相对较大。

#### 参考文献 References

- [1] Jeong Y S, Kim W J. *Corrosion Science*[J], 2014, 82: 392
- [2] Zhou Y L, Li Y, Luo D M *et al. Materials Science and Engineering C*[J], 2015, 49: 93
- [3] Ralston K D, Birbilis N, Davies C H J. *Scripta Materialia*[J], 2010, 63(12): 1201

- [4] Zhang X, Yuan G, Mao L *et al. Materials Letters*[J], 2012, 66(1): 209
- [5] Pourbahari B, Emamy M, Mirzadeh H. *Progress in Natural Science: Materials International*[J], 2017, 27: 228
- [6] Pourbahari B, Mirzadeh H, Emamy M. *Materials Science and Engineering A*[J], 2017, 680: 39
- [7] Xu S W, Zheng M Y, Kamado S *et al. Materials Science & Engineering A*[J], 2011, 528(12): 4055
- [8] Cai Yun(蔡 贇), Sun Chaoyang(孙朝阳), Wan Li(万 李) *et al. Acta Metallurgica Sinica(金属学报)*[J], 2016, 52(9): 1123
- [9] Zhu Yanchun(朱艳春), Ma Lifeng(马立峰), Huang Zhiquan(黄志权) *et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2019, 48(1): 267
- [10] Prasad Y V R K, Gegel H L, Doraivelu S M *et al. Metallurgical Transactions A*[J], 1984, 15(10): 1883
- [11] Sani S A, Ebrahimi G R, Vafaenezhad H *et al. Journal of Magnesium and Alloys*[J], 2018, 6: 134
- [12] Zhou X J, Liu C M, Gao Y H *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2017, 724: 528
- [13] Liu L F, Ding H L. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2009, 484: 949
- [14] Liu H G, Cao F Y, Song G L *et al. Journal of Materials Science & Technology*[J], 2019, 35: 2003
- [15] Zhang C Z, Zhu S J, Wang L G *et al. Materials and Design*[J], 2016, 96: 54
- [16] Kaviani M, Ebrahimi G R, Ezatpour H R. *Materials Chemistry and Physics*[J], 2019, 234: 245
- [17] Zhu Y Y, Gao W D, Huang H D *et al. Applied Surface Science* [J], 2019, 487: 581
- [18] Jia S Q, Guo Y T, Zai W *et al. Progress in Organic Coatings* [J], 2019, 136: 105

## Effect of Deformation Condition on Hot Deformation and Corrosion Behavior of As-extruded ZA21 Magnesium Alloy

Wang Panpan, Jiang Haitao, Wang Yujiao, Zhang Yun, Yu Bowen, Zhong Binbin, Cao Zhiming

(Institute of Engineering Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100086, China)

**Abstract:** The effects of deformation temperature, strain rate and deformation amount on the hot deformation behavior and microstructure of as-extruded ZA21 magnesium alloy were investigated. The processing map was established, and the immersion mass loss and electrochemical tests were carried out on the unstable zone, the safe zone and the best processing zone to study the corrosion behavior of ZA21 magnesium alloy in different regions. The results show that the dynamic softening mechanism of ZA21 magnesium alloy is mainly dynamic recovery at high temperature and low strain rate, while dynamic recrystallization is dominant at low temperature and high strain rate. The optimum processing temperature is 300~350 °C, and the strain rate is 0.001~0.01 s<sup>-1</sup>, which is mainly related to the generation of complete dynamic recrystallization. Under the same processing technology, with the increase of deformation, the self-corrosion potential of ZA21 magnesium alloy obviously positively shifts, and the self-corrosion current density significantly decreases. When the amount of deformation increases to 60%, the self-corrosion current density can decrease by 3~4 orders of magnitude. This is mainly because the grain refinement leads to a denser oxide film on the surface of the alloy. However, the microstructure of the samples in the processing instability zone has wedge cracks and obvious pores, so the corrosion rate is relatively large.

**Key words:** as-extruded ZA21 alloy; hot deformation; processing map; corrosion behavior

---

Corresponding author: Jiang Haitao, Ph. D., Professor, Institute of Engineering Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100086, P. R. China, Tel: 0086-10-62332598, E-mail: nwpujht@163.com